

BEST AVAILABLE COPY

## Geometric calibration of optical 3-D sensors for three-dimensional measurement of objects

**Patent number:** DE19536297  
**Publication date:** 1997-04-03  
**Inventor:** BEYER HORST DR (CH); MALZ REINHARD DR (DE)  
**Applicant:** DAIMLER BENZ AG (DE)  
**Classification:**  
- international: G01C25/00; G01C11/30; G01C11/26; G01D5/38  
- european: G01B11/25D, G01S7/497, G01S7/497A  
**Application number:** DE19951036297 19950929  
**Priority number(s):** DE19951036297 19950929

### Abstract of DE19536297

The method involves strip projection and triangulation using at least one camera (10), pref. a video camera, an image sequence digitising and storage device, an illumination projector (11), an illumination device and an image control and processing computer. A calibration device (12) is placed at different positions inside and at the edge of the working vol. to be calibrated and illuminated so that regions of its signal marks have maximum grey values or colour modulation in the digitised and stored images without saturation. The camera is calibrated using a standard photogrammetric method. A projector with a light modulator projects image elements onto the calibration device. The projector is calibrated by observing it as an inverse camera. The measured and stored parameters are recovered for use with the operational sensor system to correct the beam geometry in the camera and projector.

---

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

⑩ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift  
⑩ DE 195 36 297 A1

⑬ Int. Cl. 6:  
G 01 C 25/00  
G 01 C 11/30  
G 01 C 11/26  
G 01 D 5/38

DE 195 36 297 A1

⑪ Aktenzeichen: 195 36 297.7  
⑫ Anmeldetag: 29. 9. 95  
⑬ Offenlegungstag: 3. 4. 97

⑭ Anmelder:  
Daimler-Benz Aktiengesellschaft, 70567 Stuttgart,  
DE

⑮ Vertreter:  
Weber, G., 60596 Frankfurt

⑯ Erfinder:  
Malz, Reinhard, Dr., 70734 Fellbach, DE; Beyer,  
Horst, Dr., Courgenay, CH

⑰ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit  
in Betracht zu ziehende Druckschriften:

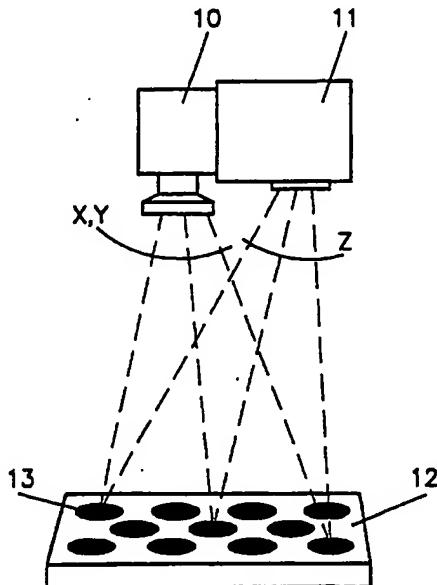
DE 41 03 648 C1  
DE 37 12 958 C1  
DE 40 37 383 A1  
DE 39 33 894 A1  
DE 38 31 630 A1  
DE 38 29 925 A1  
DE 38 17 561 A1  
DE 32 01 804 A1

US 54 14 647  
US 52 51 037  
US 39 32 745  
SU 5 53 447

DEGENKOLBE,E., HEINZE,M.: Rechnergestützte  
Justierung eines zweikanaligen optischen  
Abbildungssystems mit CCD-Zeilen. In:  
Feingerätetechnik, Berlin 37, 1988, 4, S.159- S.162;  
GRÜN,A.: Digitale Nahbereichsphotogrammetrie. In:  
AVN 8-9/1992, S.324-343;  
GERDES,R., u.a.: Kalibrierung eines digitalen  
Bildverarbeitungssystems mit CCD-Kamera Teil 1:  
Modellbildung und Verfahren. In: tm - Technisches  
Messen 60, 1993, 6, S.255-261;  
GERDES,R., u.a.: Kalibrierung eines digitalen  
Bildverarbeitungssystems mit CCD-Kamera Teil II:  
Implementierung und Fehleranalyse. In: tm -  
Technisches Messen 60, 1993, 7/8, S.283-288;  
GRANT,Ian, et. al.: Topographical measurements of  
water waves using the projection moire method. In:  
Applied Optics, Vol.29, No.28, 1 Oct. 1990,  
S.3981-3983;

⑲ Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von optischen 3D-Sensoren zur dreidimensionalen Vermessung  
von Objekten und Vorrichtung hierzu

⑳ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur geometrischen  
Kalibrierung von optischen 3-D-Sensoren zur dreidimensio-  
nalen Vermessung von Objekten relativ zu einem Referenz-  
koordinatensystem, unter Verwendung wenigstens einer  
Kamera (10), einer Einrichtung zur Digitalisierung und Spei-  
cherung von Bildfolgen der Kamera, einem zur Kamera fixierten  
Beleuchtungsprojektor (11), der zeitlich nacheinander  
Lichtstrukturen aus wenigstens eindimensionalen Strei-  
fen innerhalb eines Arbeitsvolumens erzeugt, einer Beleuch-  
tungseinrichtung zur Beleuchtung von reflektierenden Si-  
gnalmarken einer Kalibriereinrichtung (12) und eines Rech-  
ners zur Steuerung und Verarbeitung der Bilder. Die Kalib-  
riereinrichtung wird innerhalb und am Rande des Arbeits-  
volumens in verschiedene Positionen relativ zu Kamera und  
Beleuchtungsprojektor gebracht und jeweils so beleuchtet,  
daß die Bereiche der Signalmarken der Kalibriereinrichtung  
in den digitalisierten und gespeicherten Bildern eine mög-  
lichst hohe Grauwert- oder Farbmodulation ohne Übersteue-  
rung aufweisen, b) die Kalibrierung der Kameras erfolgt  
durch ein photogrammetrisches Standardverfahren zum  
Auffinden der Parameter der inneren und äußeren Orientie-  
rung, c) der Projektor weist einen Lichtmodulator auf, der  
nach außen sichtbare Muster aus beliebigen Streifen oder  
Pixeln als Bildelemente auf die Kalibriereinrichtung projiziert,  
d) zur Kalibrierung des Projektors wird dieser als  
inverse Kamera betrachtet, indem den äußeren Bildelemen-  
ten ein reelles oder ...



DE 195 36 297 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 02. 97 702 014/201

15/25

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von optischen 3D-Sensoren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten relativ zu einem Referenzkoordinatensystem auf den Prinzipien der Streifenprojektion und der Triangulation, unter Verwendung wenigstens einer Kamera, einer Einrichtung zur Digitalisierung und Speicherung von Bildfolgen der Kamera, mindestens einem zur Kamera fixierten Beleuchtungsprojektor, der zeitlich nacheinander Lichtstrukturen aus wenigstens eindimensionalen Streifen innerhalb eines Arbeitsvolumens erzeugt, mindestens einer Beleuchtungseinrichtung zur gleichmäßigen Beleuchtung von reflektierenden und/oder streuenden Signalmarken einer Kalibriereinrichtung und eines Rechners zur Steuerung und Verarbeitung der Bilder sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Verfahren zur Kamerakalibrierung sind bekannt. Dabei werden mit einer Kamera Punkte aufgenommen, deren Koordinaten bekannt sind, also die x-, y- und z-Koordinaten in der Welt bekannt sind und die Bilder ausgewertet. Die Kalibrierung der Kamera beruht dann darauf, daß die Bildkoordinaten mit den Weltkoordinaten in Übereinstimmung gebracht werden. Die Kalibrierung eines Projektors ist im Unterschied dazu schwieriger, weil der Projektor gewissermaßen nicht sehen kann, wohin er leuchtet. Der Projektor sendet zwar einen bestimmten Streifen mit der Nummer x aus, es gibt jedoch keine Möglichkeit mit dem Projektor selbst festzustellen, wo der Streifen in der Welt landet, dazu bedarf es zusätzlicher Hilfsgeräte, nämlich weiterer Kameras im System. Beobachtet man mit einer kalibrierten und orientierten Kamera diese Streifen eines Projektors in der Welt und kennt die Streifen, die der Projektor intern (virtuell) gesendet hat, kann man den Zusammenhang zwischen den externen (visuellen) Streifen des Projektors und den internen (virtuellen) Streifen des Projektors herstellen. Jedoch weiß man nicht, an welcher Stelle man sich längs eines externen Streifens befindet. Wenn der Streifen x gesendet wird, so findet man in der Welt mit der Kamera diesen Streifen x wieder, jedoch weiß man nicht, welche x-y-Stelle im Projektor, an der das Licht erzeugt wurde, dann an der Stelle x-y-z in der Welt auftaucht. Das bedeutet, daß nicht jedem Bildpunkt der Kamera ein räumlicher Koordinatenwert zugeordnet werden kann.

Es sind flächenhafte optische Meßverfahren mit einer Matrixkamera und einem Projektor für unkodierte oder kodierte Streifen bekannt, bei denen die dreidimensionalen Koordinaten der Oberflächenpunkte aus den beiden Bildkoordinaten des Kamerabildes und der an der jeweiligen Bildkoordinate detektierten Streifennummer berechnet werden (Reinhard W. Malz: Codierte Lichtstrukturen für 3-D-Meßtechnik und Inspektion, Thesis, Universität Stuttgart 1992, Reihe: Berichte aus dem Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart). Ebenso sind Verfahren mit mehreren Projektoren bekannt.

Des weiteren sind photogrammetrische optische Meßverfahren mit mehreren Matrixkameras oder einer Matrixkamera in mehreren Positionen bekannt, bei denen die dreidimensionalen Koordinaten eindeutig bestimmbarer Punkte im Raum aus mehreren Ansichten derselben numerisch bestimmt werden. Zur Erzeugung eindeutig bestimmbarer Punkte im Objektraum werden natürliche Objektmerkmale, zum Beispiel reguläre oder stochastische Grauwert- oder Farbverteilungen am Objekt, ebenso genutzt wie künstliche Merkmale wie aufgeklebte oder aufprojizierte Marken bzw. reguläre oder stochastische Grauwert- oder Farbverteilungen.

Bekannt sind des weiteren photogrammetrische Verfahren, die die räumliche Lage einer Kamera relativ zu mehreren sichtbaren Referenzpunkten bestimmen können, deren absolute Koordinaten bekannt sind (Räumlicher Rückwärtsschnitt). Ebenso sind photogrammetrische Verfahren bekannt, die mehrere räumliche Lagen einer Kamera relativ zueinander bestimmen können, sofern die aus mehreren Lagen aufgenommenen Bilder mehrere gemeinsame Referenzpunkte enthalten, deren Koordinaten vorab nicht bekannt sein müssen (Bündelausgleichung). Bei diesem Verfahren werden zusätzlich zu den Lagen der Kamera auch die Koordinaten der in mehreren Bildern sichtbaren Punkte berechnet (Punktmessung).

Des Weiteren sind photogrammetrische Kalibrierverfahren bekannt zur Bestimmung der Strahlgeometrie von Kameras. Hierbei werden durch mehrfache Beobachtung eines zeitlich invarianten Kalibrierkörpers mittels numerischer Verfahren die inneren Parameter der Kamera hinsichtlich Brennweite, Verzeichnungen etc. bestimmt. Photogrammetrische Kalibrierverfahren erreichen eine hohe Präzision und erfordern keine Präzisionspositioniereinrichtungen. Bei einem Objektfeld von z.B. 250 mm x 350 mm und einer Kameraauflösung von 500 x 700 Pixeln sind laterale Fehler im Objektfeld von > 10 µm ( $1\sigma$ ) erreichbar.

Des Weiteren ist ein aktives optisches Triangulationsverfahren zur Bestimmung der Strahlgeometrie von Projektoren zur Oberflächenvermessung bekannt geworden, bei dem der Projektor in der Lage sein muß, Linienkreuze zu projizieren, deren Lage von einem photogrammetrischen Kameraverband vermessen wird (Th. Strutz: Ein genaues aktives optisches Triangulationsverfahren zur Oberflächenvermessung, Thesis, Technische Universität Braunschweig, 1993). Diese Kalibrierung erfordert somit einen speziellen Projektor, der Linienkreuze zu projizieren imstande ist.

Ebenso sind numerische Kalibrierverfahren bekannt, die den durch Zentralperspektiven von Kamera und Projektor sowie durch optische Abbildungsfehler verzerrten Bildraum  $[f(x,y)]$  mittels Polynome an den 3D-Objektraum  $(x,y,z)$  adaptieren (B. Breuckmann et al: Präzisionskalibrierung von topometrischen Sensoren, LASER 95, München, 19.-23.06.1995). Dabei wird eine weiße Platte, auf die mehrere schwarze Kreisringe aufgebracht sind, mehrfach exakt in Normalenrichtung verschoben und jeweils entsprechend dem Sensorprinzip mit unterschiedlichen Streifenmustern beleuchtet. Die innerhalb der Kreisringe detektierten Meßwerte werden zur Kalibrierung verwendet. Nachteilig ist, daß diese Kalibrierung eine hochgenaue und wohldefinierte mechanische Positionierung erfordert, da die Kalibrierplatte exakt in Normalenrichtung bewegt werden muß. Des Weiteren ist die Korrekturrechnung aufgrund der zahlreichen Polynomkoeffizienten langwierig. Das Kalibrierverfahren ist nicht für den Einsatz in Verbindung mit photogrammetrischen Verfahren (Navigation, Bündeltriangulation) geeignet, welche auf kompakte und physikalisch begründete Kamera- und Projektormodelle gestützt sind.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs genannten Gattung und eine Vorrich-

tung zur Durchführung des Verfahrens zu schaffen, mit welchen bei einer Messung prinzipiell jedem Bildpunkt der Kamera ein räumlicher Koordinatenwert in einem Referenzkoordinatensystem zugeordnet werden kann, wobei der Koordinatenwert beliebig reproduzierbar ist.

Zweck der Erfindung ist zum Beispiel Herstellungsmaschinen, wie Pressen oder Fräsen oder Werkzeugmaschinen, mittels der Erfindung so zu steuern, daß über die optische Aufnahme eines Probenkörpers ein hochgenaues Werkstück als Abbild des Probenkörpers hergestellt werden kann oder softwaremäßig praktisch beliebige Manipulationen am virtuellen Bildmaterial vorgenommen und wieder als Werkstück ausgegeben werden können. 5

Die Lösung der Aufgabe besteht erfindungsgemäß darin, daß a) die Kalibriereinrichtung innerhalb und am Rande des zu kalibrierenden Arbeitsvolumens nacheinander in verschiedene Positionen relativ zu Kamera und Beleuchtungsprojektor gebracht und die Kalibriereinrichtung jeweils so beleuchtet wird, daß die Bereiche der Signalmarken der Kalibriereinrichtung in den digitalisierten und gespeicherten Bildern eine möglichst hohe Grauwert- oder Farbmodulation ohne Übersteuerung aufweisen, b) die Kalibrierung der Kameras durch ein photogrammetrisches Standardverfahren erfolgt zum Auffinden der Parameter der inneren und äußeren Orientierung, c) der Projektor einen Lichtmodulator aufweist, der nach außen sichtbare Muster aus beliebigen Streifen oder Pixeln als Bildelemente auf die Kalibriereinrichtung projiziert, d) zur Kalibrierung des Projektors dieser als inverse Kamera betrachtet wird, indem den äußeren Bildelementen ein reales oder fiktives x-y-Projektionsmuster definierter Breite aber unbestimmter Länge im Innern des Projektors zugeordnet wird, und zur Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung des Beleuchtungsprojektors mehrere Beobachtungen (Bildfolgen) herangezogen werden, in denen jeweils geometrische Zusammenhänge zwischen den x-y-Projektionsmustern (interne Projektorstreifenkoordinaten) und den korrespondierenden außen sichtbaren Mustern hergestellt werden, e) die gefundenen und gespeicherten Kalibrierparameter beim Einsatz des 3D-Sensorsystems zur Vermessung von Objekten von einem Algorithmus wiederverwendet werden, der einerseits die Strahlgeometrien innerhalb der Kamera und des Projektors korrigiert, zum anderen basierend auf dem Prinzip der Triangulation die x,y,z-Koordinaten des Objektes im Objektraum berechnet. 10 15 20 25

Der Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, daß mit demselben prinzipiell jedem Bildpunkt auf aufnehmenden Kamera ein räumlicher Koordinatenwert in einem Referenzkoordinatensystem zugeordnet werden kann, der beliebig reproduzierbar ist. Dazu besteht die 3D-Sensoranordnung aus mindestens einer Kamera, wie Videokamera, Still Video Camera, Scanning Camera, und einer Einrichtung zur Digitalisierung und Speicherung von Bildfolgen der Kamera, mindestens einem zur Kamera fixierten Beleuchtungsprojektor, der zeitlich nacheinander Lichtstrukturen aus wenigstens eindimensionalen Streifen innerhalb eines Arbeitsvolumens erzeugt, mindestens einer Beleuchtungseinrichtung zur gleichmäßigen Beleuchtung von reflektierenden und/oder streuenden Signalmarken einer Kalibriereinrichtung und aus einem Rechner zur Steuerung und Verarbeitung der Bilder. 30

Der Kalibrierkörper (Welt) ist zum Zweck der Kalibrierung mit einem schwarz-weiß-gestreiften Muster ausgestattet, was ungefähr orthogonal zu dem ges endeten Streifenmuster des Projektors liegt. Dadurch werden die Streifen des Projektors periodisch unterbrochen und es entstehen ungefähr quadratische helle Lichtflecke. Diese Lichtflecke können von einer Kamera lokal, also in zwei oder in drei Dimensionen, detektiert werden und geben eine Aussage über den Ort des Streifens im Referenzkoordinatensystem (Welt). Existieren zur Kalibrierung eines Projektors zwei Kameras, die ein Stereopaar bilden, so betrachten diese Kameras die Kalibrierplatte mit den weißen Quadranten. Dieses Stereopaar kann somit diese quadratischen weißen Flecken der Kalibrierplatte im Raum bestimmen. 35 40

Ebenso ist es möglich, auf die zweite Kamera zu verzichten und die Ortsbestimmung der weißen Quadrate auf der Kalibrierplatte mit einer einzigen Kamera zu bewerkstelligen. Das ist möglich, wenn mit der einer Kamera zunächst der Ort der Kalibrierplatte im Raum bestimmt wird über einen sogenannten Vorwärtsschnitt. Voraussetzung hierzu ist, daß die Kamera gewissermaßen die Geometrie der Kalibrierplatte kennt und aufgrund der perspektivischen Verzerrung die Lage der Kalibrierplatte relativ zu der Kamera berechnet, um dann in einem zweiten Schritt zu bestimmen, wo die weißen Quadrate in der Ebene der Kalibrierplatte liegen, so daß diese dreidimensional bestimmt sind. Zur Projektorkalibrierung wird zunächst ein Zwei-Kamera-System kalibriert, d. h. es wird von einer Kamera selbst die innere Kalibrierung gemacht und anschließend die relative Zuordnung zueinander, so daß ein komplettes absolut kalibriertes Stereopaar zur Verfügung steht. Dieses ist geeignet, Punkte im Raum absolut zu vermessen, die von beiden Kameras gesehen werden. Werden somit weiße Projektorquadrate auf der Kalibrierplatte erzeugt, so können diese auch absolut im Raum vermessen werden. Wird dies in verschiedenen Stellungen der Kalibrierplatte getan, so läßt sich der Strahlengang der Projektorstreifen im Raum verfolgen und durch das Projektionszentrum in der Kamera durch die Projektorpupille extrapoliieren, 50 55 womit die gesamte Geometrie des Projektors festgelegt ist.

Die relative Position und Orientierung von Kamera und Projektor bzw. Kameras und Projektoren kann zueinander temporär, d. h. für die Dauer von Kalibrierung und Messung oder dauerhaft, zum Beispiel durch eine mechanische starre Verbindung fixiert sein. 60

Zur Selbstkalibrierung der Kamera kann die Kalibriereinrichtung vorteilhaft wenigstens vier kalibrierte und eine Vielzahl weiterer Signalmarken oder Referenzmarken aufweisen, die sich im Bildfeld der Kamera befinden müssen. Daraus können zunächst mit Hilfe direkter Lösungen (Literatur Beyer) Näherungen für die Elemente der äußeren Orientierung der Kamera relativ zum Referenzkoordinatensystem (Weltkoordinatensystem) berechnet werden. Ausgehend von diesen Näherungen kann die exakte äußere Orientierung des aktiv-optischen Systems in bezug auf den objektbezogenen Koordinatenrahmen berechnet werden. 65

In vorteilhafter Weise können zur näherungsweisen automatischen Orientierung der Kalibriereinrichtung relativ zur Kamera wenigstens drei der kalibrierten und/oder der Vielzahl der weiteren Signalmarken kodiert sein, sofern die Koordinaten der letzteren zumindest näherungsweise bekannt sind. Mit dem Einsatz kodierter

Signalmarken und direkten Lösungen für die Bestimmung der Näherungen kann somit das Verfahren vollautomatisch durchgeführt werden. Dabei können die Berechnungen sowohl Indikatoren für die Genauigkeit, d. h. Standardabweichungen der Orientierungselemente, als auch Indikatoren für die Robustheit des Verfahrens ausgeben.

5 Bei mehreren Kameras können diese über gleiche oder unterschiedliche Fokussierung für verschiedene Entfernung verfügen ebenso wie sie über gleiche oder unterschiedliche Bildwinkel verfügen können wie die Kameras auch gleiche oder unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit aufweisen können. Ebenso können die Kameras in die gleiche oder in verschiedene Raumrichtungen blicken und gleichzeitig oder zu unterschiedlichen Zeiten Bilder aufnehmen.

10 Es können durch das Verfahren Signalmarken mit einem hohen Kontrast mit sehr hoher Genauigkeit vermessen werden und zwar wenigstens zwischen 1/30 bis 1/100 Pixel.

Will man solche Systeme kalibrieren, die nur aus einer Kamera und einem Projekt bestehen, so ist eine Zusatzinformation erforderlich, es muß dann gefordert werden, daß die Kalibrierplatte exakt beschrieben wird, d. h., daß diese vollständig eben ist und daß die schwarzen Streifen, die den Projektorstreifen schneiden, ebenfalls präzise definiert sind. Ist das der Fall, kann aus einem einzigen Kamerabild jeweils die Lage der Kalibrierplatte im Raum bestimmt werden, womit wiederum die Lage der weißen Quadrate auf der Kalibrierplatte bestimmt ist. Beim Zweikamerakalibrierverfahren werden die weißen Quadrate auf der Kalibrierplatte von beiden Kameras gesehen, weitere Informationen der Platte sind nicht erforderlich. Beim Einkamerakalibrierverfahren muß, um die Kalibrierplatte im Raum lokalisieren zu können, auch eine Vermessung der Retromarken oder Signalmarken der Kalibrierplatte erfolgen. Auf der Basis dieser Information wird eine affine Transformation durchgeführt, aus der sich die Lage der Kalibrierplatte ergibt. Bei der affinen Transformation wird das beobachtete Bild der Retromarken bzw. Signalmarken mit einem abgespeicherten Bild der Kalibrierplatte verglichen, die Platte wird dann durch eine numerische Operation so gedreht, bis das Bild mit dem abgespeicherten Bild übereinstimmt, wodurch dann alle sechs Freiheitsgrade der Drehung der Translation im Raum bekannt sind.

25 Vorzugsweise kann mit einer Kamera und einem Projektor ein aktives 3D-Meßsystem kalibriert und ein solches Meßsystem aufgebaut werden, wozu zum Zwecke der Kalibrierung eine zweite Kamera beigestellt wird, die mit der ersten Kamera ein Stereopaar bildet, solange die Kamera kalibriert wird. Nach erfolgter Kalibrierung kann die zweite beigestellte Kamera wieder entfernt werden, wonach der kalibrierte Projektor zusammen mit der ersten verbleibenden Kamera ein aktives Meßsystem bildet. Dieser Ansatz mit zwei Kameras zur 30 Kalibrierung kann selbstverständlich auch für Systeme benutzt werden, die von vornherein und permanent zwei Kameras aufweisen. In diesem Fall könnte die Streifenauswertung des Projektors sowohl mit der einen als auch mit der anderen Kamera erfolgen, so daß gewissermaßen zwei gekoppelte Meßsysteme vorliegen, die einmal mit der einen Kamera und dem Projektor und das andere Mal mit der anderen Kamera und demselben Projektor arbeiten. Ebenso ist es möglich, daß beide Kameras, wie beim Kalibrieren, auch beim Messen ein Stereopaar 35 bilden und der Projektor als zusätzliche Information zur Markierung des Objektes verwendet wird.

Wesentlich ist, daß die Kalibrierplatte in ihrer Form bekannt ist, die Anordnungen der Signalmarken vorab vermessen wird und daß die Kalibrierplatte über codierte Marken verfügt, die eine automatische Orientierung der Kalibrierplatte im Raum ermöglicht; wenigstens vier Gitterpunkte auf der Kalibrierplatte dienen dann der Orientierung derselben relativ zur Kamera. Vorteilhaft ist es, wenn die vier Kalibrierpunkte codiert sind, damit ihre Reihenfolge automatisch identifiziert werden kann.

40 Vorteilhaft wird ein Projektor verwendet, der nur ein einziges periodisches Grauwert- oder Farbgitter projiziert, das in ein Phasenbild umgerechnet werden kann (laterales Phasenshiftverfahren), wobei die für die Kalibrierung erforderlichen Projektorstreifen synthetisch aus dem Phasenbild abgeleitet werden und die Schwarz-Weiß-Schwarz-Übergänge der synthetischen Streifen jeweils Orte konstanter Phase im Phasenbild darstellen.

45 Der Algorithmus zur Wiedererkennung der Kalibrierparameter korrigiert ebenfalls die im Projektormodell vorgesehenen und von üblichen Fehlermodellen für Kameras abweichenden Verzeichnungsfehler, zum Beispiel durch eine zylindrische Projektionsoptik verursachten Fehler; der zunächst nicht direkt beobachtbare Ort längs des Projektorstreifens wird zum Zwecke der Verzeichnungskorrektur über eine iterative Rechnung bestimmt.

50 Ist die Kalibriereinrichtung eine ebene Kalibrierplatte, so kann sie wenigstens vier kalibrierte Signalmarken aufweisen, und das zur Kalibrierung erforderliche schwarz-weiße Streifengitter bekannter Geometrie synthetisch erzeugt werden, indem ein berechnetes Streifengitter mit Hilfe der aktuell bestimmten Orientierungsparameter in die Bildebene der Kamera transformiert und mit dem Bild der Kalibrierplatte logisch verknüpft wird.

Vorteilhaft ist somit als Kalibriereinrichtung eine ebene Kalibrierplatte, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken und ein schwarz-weißes Streifengitter bekannter Geometrie aufweist.

55 Die Kalibriereinrichtung kann aber auch eine nichtebene Kalibrierplatte sein, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken und ein schwarz-weißes Streifengitter bekannter Geometrie aufweist, wobei wenigstens zwei Kameras zum Einsatz gelangen, mit welchen die aktuelle Topologie der Kalibriereinrichtung jederzeit nachmeßbar ist.

60 Wenn die Kalibriereinrichtung eine ebene Kalibrierplatte ist, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken aufweist, so kann das zur Kalibrierung erforderliche schwarz-weiße Streifengitter bekannter Geometrie synthetisch erzeugt werden, indem ein berechnetes Streifengitter mit Hilfe der aktuell bestimmten Orientierungsparameter in die Bildebene der Kamera transformiert und mit dem Bild der Kalibrierplatte logisch verknüpft wird.

65 Weitere Vorteile der Erfindung bestehen insbesondere in einer Kostenreduktion durch Verzicht auf mechanische Präzisionspositioniereinrichtungen wie Koordinatenmeßgeräte, Präzisions-Meßroboter, oder zusätzliche Präzisionsmeßsysteme, wie Theodolit, Interferometer, die ansonsten die Länge von Werkstück oder Sensor messen.

Kurzbeschreibung der Zeichnung, in der zeigen:

Fig. 1 eine prinzipielle Darstellung einer Kamera-Projektor-Einheit als Sensor, der auf eine Kalibrierplatte gerichtet ist,

Fig. 2 eine mögliche Ausführung einer Kalibriereinrichtung in Form einer ebenen Kalibrierplatte,

Fig. 3 eine schematische Darstellung der Verschiebung der Kalibrierplatte im Arbeitsvolumen,

Fig. 4 eine beleuchtete Kalibrierplatte mit retroreflektierenden Marken,

Fig. 5 ein typisches Beleuchtungsfeld eines Projektors wie er im Verfahren Anwendung findet,

Fig. 6 eine Kalibrierplatte unter Beleuchtung mit einem periodischen Projektorstreifenmuster.

Fig. 1 zeigt eine kompakte Ausführung eines 3D-Sensors bestehend aus einer Kamera 10 und einen Projektor 11, wobei die Strahlen der Kamera 10 mit x-y-Koordinaten und die eindimensionale Streifenkoordinate des Projektors 11 mit z bezeichnet sind. Weiterhin ist in Fig. 1 eine Kalibrierplatte 12 mit mehreren Signalmarken 13 gezeigt, die sich im Blickfeld von Kamera 10 und Projektor 11 befindet.

Fig. 2 zeigt eine mögliche Ausführung einer Kalibriereinrichtung als ebene Platte 21 mit den vier Ecken A, B, C, D und mit drei verschiedenen Strukturen: Erstens codierte Marken 22 mit einem eindeutig identifizierbaren Label, die in der Mitte der Kalibrierplatte 21 quadratisch angeordnet sind. Weitere uncodierte Marken 23, weiterhin parallele schwarz-weiße Streifenmuster 24, die in der Anwendung dann orthogonal zu den Projektorstreifen stehen und aus den Projektorstreifen stückweise Abschnitte herausschneiden.

Fig. 3 zeigt schematisch, wie eine Kalibrierplatte 30 mit ihren vier Ecken A, B, C, D im Arbeitsvolumen 31 bewegt wird, wobei das Arbeitsvolumen 31 dargestellt ist durch ein Drahtmodell mit den Punkten P1 bis P12 in Zuordnung der Ecken A, B, C, D die den Punkten P1 bis P12 entsprechen sollen; diese Punkte werden in einer Tabelle abgelegt, Tabelle 1.

Tabelle 1

Bild	Ecke A	Ecke B	Ecke C	Ecke D	
1	P 1	P 2	P 3	P 4	25
2	P 2	P 3	P 4	P 1	
3	P 3	P 4	P 1	P 2	
4	P 4	P 1	P 2	P 3	30
5	P 1	P 6	P 7	P 4	
6	P 6	P 7	P 4	P 1	
7	P 7	P 4	P 1	P 6	35
8	P 4	P 1	P 6	P 7	
9	P 9	P 10	P 11	P 12	
10	P 10	P 11	P 12	P 9	40
11	P 11	P 12	P 9	P 10	
12	P 12	P 9	P 10	P 11	
13	P 5	P 10	P 11	P 8	
14	P 10	P 11	P 8	P 5	45
15	P 11	P 8	P 5	P 10	
16	P 8	P 5	P 10	P 11	

Fig. 4 beschreibt die Kalibrierplatte 41 der Fig. 2 und eine Beleuchtung mit retroreflektierenden Marken 42, 50 wobei nur diese mit erkennbarer Helligkeit zu sehen sind.

Fig. 5 zeigt das typische Beleuchtungsfeld des Projektors, bei dem mehrere Projektorstreifen jeweils zu einem Streifenblock zusammengefaßt sind, z. B. ist im Streifenblock 51 der Projektstreifen 1 bis 8 zusammengefaßt und auf weiß geschaltet, im Streifenblock 52 sind die Projektstreifen 9 bis 16 zusammengefaßt und schwarz geschaltet usw.

Fig. 6 zeigt die Kalibrierplatte der Fig. 2 unter Beleuchtung mit einem periodischen Projektorstreifenmuster unter einem Winkel von 90 Grad; bei dieser Art der Beleuchtung werden die Projektiorichtstreifen in kleine quadratische Bereiche 61 unterteilt, die einer Vermessung einer photogrammetrischen Erkennung und Vermesung mittels Kamera und Bildkorrelation zugänglich sind, und zwar gemäß der Fig. 3.

Die Erfindung ist insbesondere dazu anwendbar, eine Ein-Kamera-Projektor-Einheit oder eine Zwei-Kamera-Projektoreinheit unter Verzicht auf teure Präzisionskalibriereinrichtungen zu kalibrieren, um mit einem dergestalt kalibrierten Ein-Kamera-Projektor-Sensor oder Zwei-Kamera-Projektor-Sensor bei einer nachfolgenden Messung prinzipiell jedem Bildpunkt der Kamera einen räumlichen Koordinatenwert in einem Referenzkoordinatensystem in eindeutiger und reproduzierbarer Weise zuzuordnen. Damit können Herstellungsmaschinen, wie Pressen oder Fräsen oder Werkzeugmaschinen angesteuert werden, so daß über die optische Aufnahme eines Probenkörpers ein hochgenaues Werkstück als Abbild des Probenkörpers hergestellt werden kann oder softwaremäßig praktisch beliebige Manipulationen am virtuellen Bildmaterial vorgenommen und wieder als Werkstück ausgegeben werden können.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur geometrischen Kalibrierung von optischen 3D-Sensoren zur dreidimensionalen Vermessung von Objekten relativ zu einem Referenzkoordinatensystem auf den Prinzipien der Streifenprojektion und der Triangulation, unter Verwendung wenigstens einer Kamera (10), vorzugsweise Videokamera, einer Einrichtung zur Digitalisierung und Speicherung von Bildfolgen der Kamera, mindestens einem zur Kamera fixierten Beleuchtungsprojektor (11), der zeitlich nacheinander Lichtstrukturen aus wenigstens eindimensionalen Streifen innerhalb eines Arbeitsvolumens erzeugt, mindestens einer Beleuchtungseinrichtung zur gleichmäßigen Beleuchtung von reflektierenden und/oder streuenden Signalmarken einer Kalibriereinrichtung (12) und eines Rechners zur Steuerung und Verarbeitung der Bilder, dadurch gekennzeichnet, daß
- 5 a) die Kalibriereinrichtung innerhalb und am Rande des zu kalibrierenden Arbeitsvolumens nacheinander in verschiedene Positionen relativ zu Kamera und Beleuchtungsprojektor gebracht und die Kalibriereinrichtung jeweils so beleuchtet wird, daß die Bereiche der Signalmarken der Kalibriereinrichtung in den digitalisierten und gespeicherten Bildern eine möglichst hohe Grauwert- oder Farbmodulation ohne Übersteuerung aufweisen,
  - 10 b) die Kalibrierung der Kameras durch ein photogrammetrisches Standardverfahren erfolgt zum Auffinden der Parameter der inneren und äußeren Orientierung,
  - 15 c) der Projektor einen Lichtmodulator aufweist, der nach außen sichtbare Muster aus beliebigen Streifen oder Pixeln als Bildelemente auf die Kalibriereinrichtung projiziert,
  - 20 d) zur Kalibrierung des Projektors dieser als inverse Kamera betrachtet wird, indem den äußeren Bildelementen ein reales oder fiktives x-y-Projektionsmuster definierter Breite aber unbestimmter Länge im Innern des Projektors zugeordnet wird, und zur Bestimmung der Parameter der inneren und äußeren Orientierung des Beleuchtungsprojektors mehrere Beobachtungen (Bildfolgen) herangezogen werden, in denen jeweils geometrische Zusammenhänge zwischen den x-y-Projektionsmustern (interne Projektorstreifenkoordinaten) und den korrespondierenden außen sichtbaren Mustern hergestellt werden,
  - 25 e) die gefundenen und gespeicherten Kalibrierparameter beim Einsatz des 3D-Sensorsystems zur Vermessung von Objekten von einem Algorithmus wiederverwendet werden, der einerseits die Strahlgeometrien innerhalb der Kamera und des Projektors korrigiert, zum anderen basierend auf dem Prinzip der Triangulation die x,y,z-Koordinaten des Objektes im Objektraum berechnet.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kamera mittels einer Kalibriereinrichtung mit wenigstens vier kalibrierten und eine Vielzahl weiterer Signalmarken selbstkalibriert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur näherungsweisen automatischen Orientierung der Kalibriereinrichtung relativ zur Kamera wenigstens drei der kalibrierten und/oder eine Vielzahl der weiteren Signalmarken kodiert werden, sofern die Koordinaten der letzteren zumindest näherungsweise bekannt sind.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein Projektor verwendet wird, der nur ein einziges periodisches Grauwert- oder Farbgitter projiziert, das in ein Phasenbild umgerechnet werden kann (laterales Phasenshiftverfahren), wobei die für die Kalibrierung erforderlichen Projektorstreifen synthetisch aus dem Phasenbild abgeleitet werden und die Schwarz-Weiß-Schwarz-Übergänge der synthetischen Streifen jeweils Orte konstanter Phase im Phasenbild darstellen.
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Algorithmus zur Wiedererkennung der Kalibrierparameter die im Projektormodell vorgesehenen und von üblichen Fehlermodellen für Kameras abweichenden Verzeichnungsfehler, zum Beispiel durch eine zylindrische Projektionsoptik verursachten Fehler, ebenfalls korrigiert und daß der zunächst nicht direkt beobachtbare Ort längs des Projektorstreifens zum Zwecke der Verzeichnungskorrektur über eine iterative Rechnung bestimmt wird.
6. Verfahren nach Anspruch 1 unter Verwendung einer ebenen Kalibrierplatte als Kalibriereinrichtung, dadurch gekennzeichnet, daß die Kalibrierplatte wenigstens vier kalibrierte Signalmarken aufweist, und daß das zur Kalibrierung erforderliche schwarz-weiße Streifengitter bekannter Geometrie synthetisch erzeugt wird, indem ein berechnetes Streifengitter mit Hilfe der aktuell bestimmten Orientierungsparameter in die Bildebene der Kamera transformiert wird und mit dem Bild der Kalibrierplatte logisch verknüpft wird.
7. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kalibriereinrichtung eine ebene Kalibrierplatte ist, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken und ein schwarz-weißes Streifengitter bekannter Geometrie aufweist.
8. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kalibriereinrichtung eine nichtebene Kalibrierplatte ist, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken und ein schwarz-weißes Streifengitter bekannter Geometrie aufweist, wobei wenigstens zwei Kameras zum Einsatz kommen, mit welchen die aktuelle Topologie der Kalibriereinrichtung jederzeit nachmeßbar ist.
9. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Kalibriereinrichtung eine ebene Kalibrierplatte ist, die wenigstens vier kalibrierte Signalmarken aufweist, wobei das zur Kalibrierung erforderliche schwarz-weiße Streifengitter bekannter Geometrie synthetisch erzeugt ist, indem ein berechnetes Streifengitter mit Hilfe der aktuell bestimmten Orientierungsparameter in die Bildebene der Kamera transformiert wird und mit dem Bild der Kalibrierplatte logisch verknüpft wird.

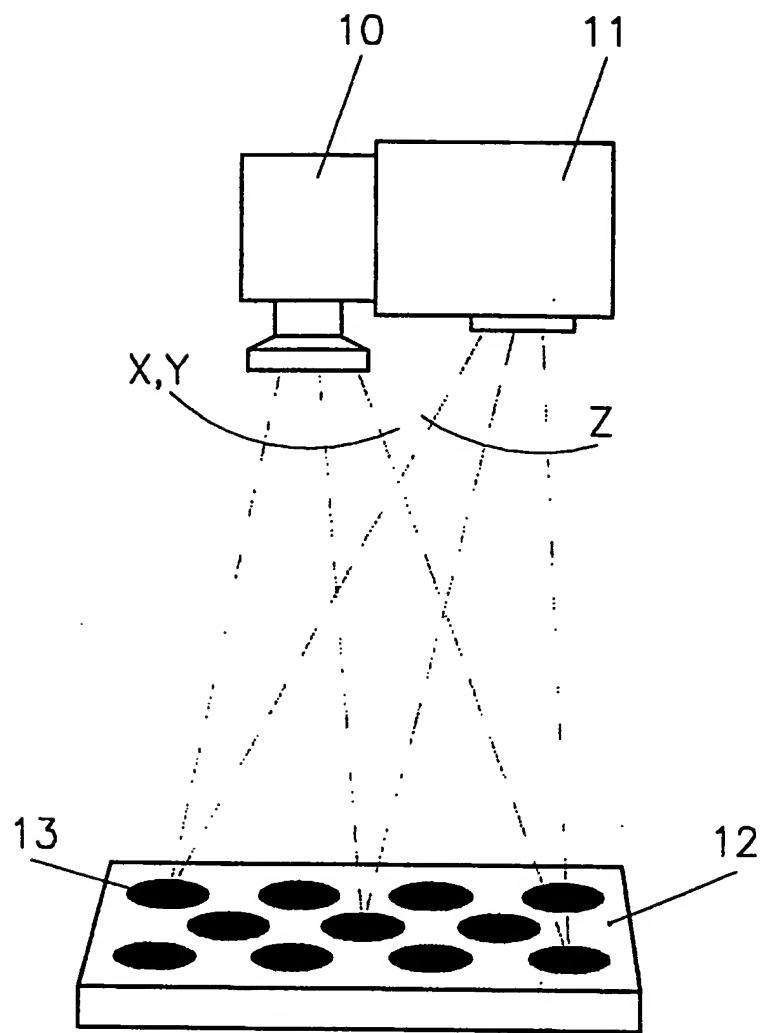


Fig. 1

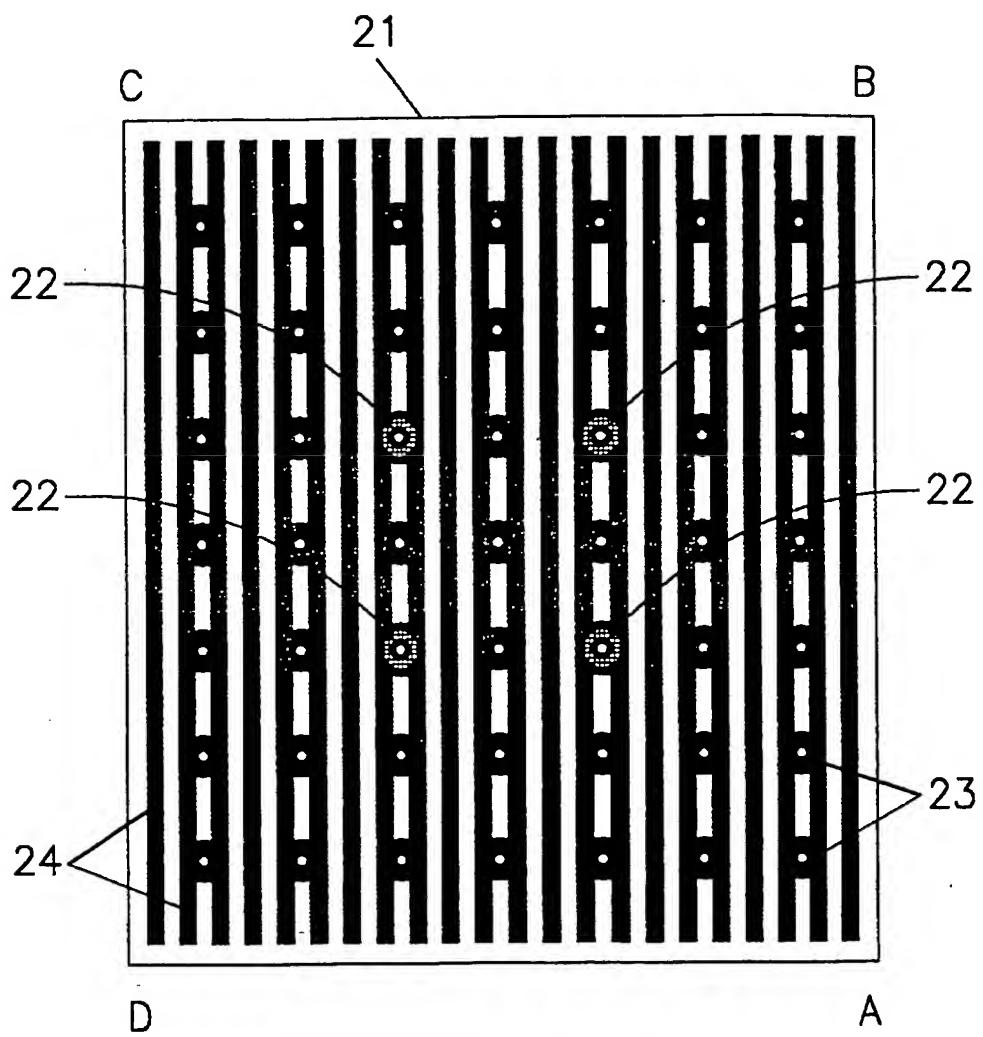


Fig. 2

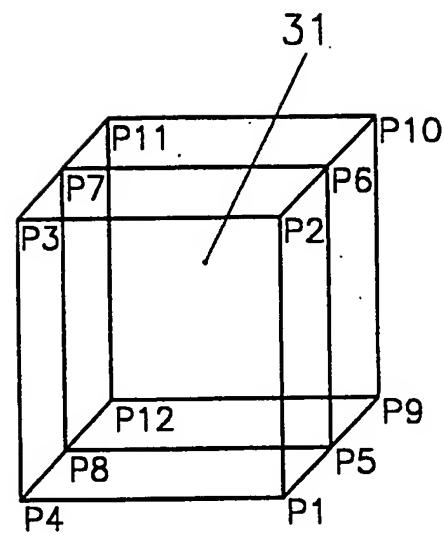
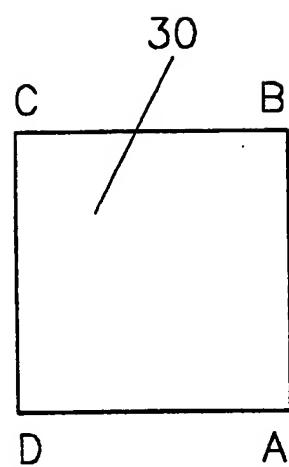


Fig. 3

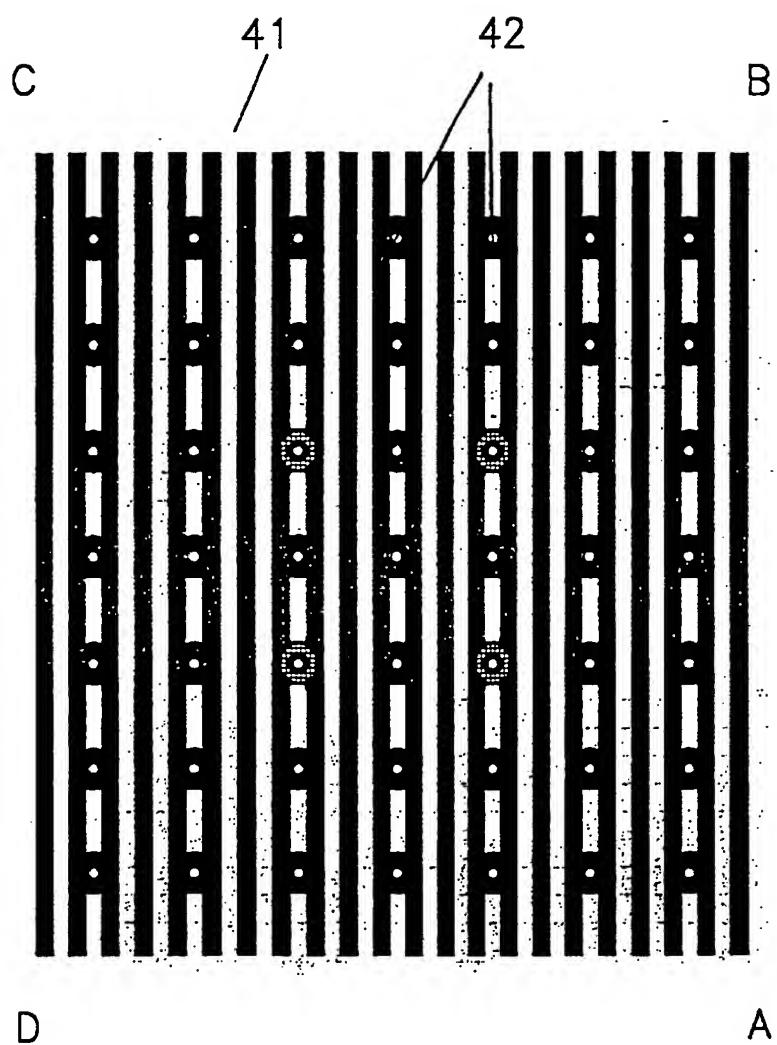


Fig. 4

Nummer:

Int. Cl.<sup>6</sup>:

Offenlegungstag:

DE 195 36 297 A1

G 01 C 25/00

3. April 1997

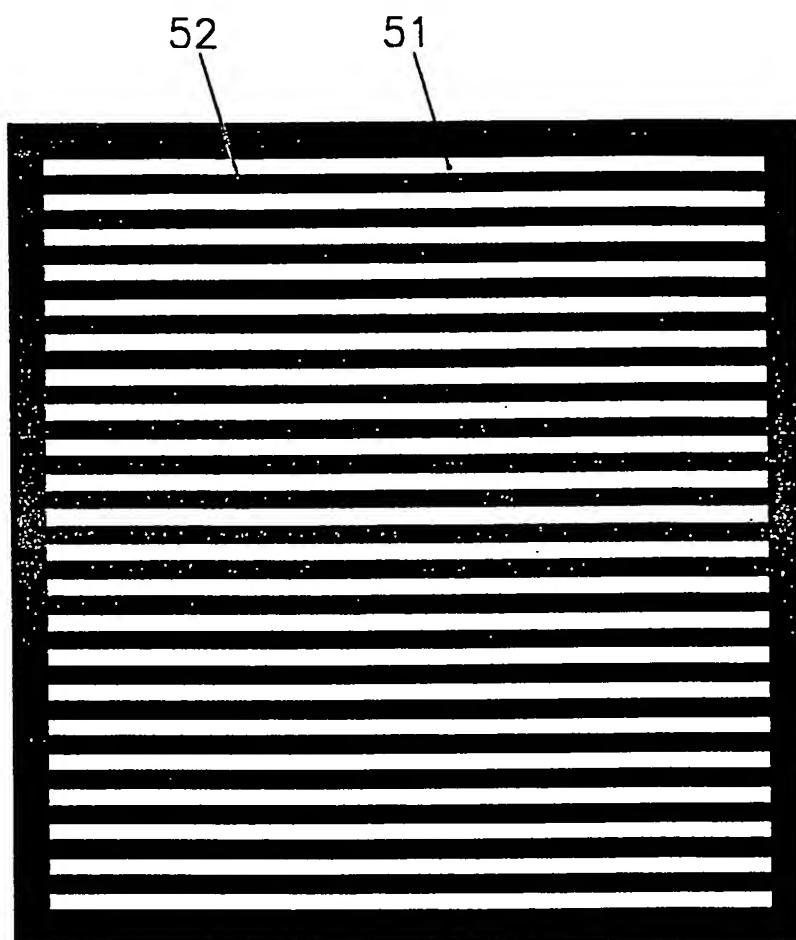


Fig. 5

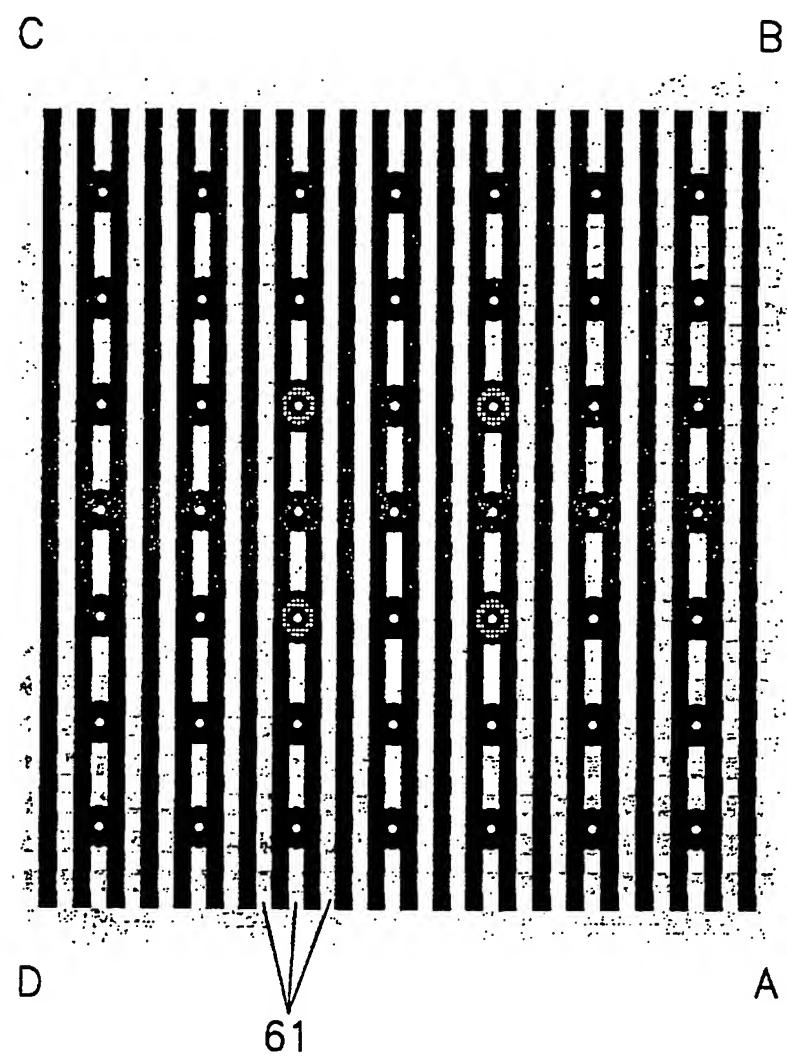


Fig. 6

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- BLACK BORDERS**
- IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- FADED TEXT OR DRAWING**
- BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- SKEWED/SLANTED IMAGES**
- COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- GRAY SCALE DOCUMENTS**
- LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**